

506/521

(12) DEMANDE INTERNATIONALE PUBLIÉE EN VERTU DU TRAITÉ DE COOPÉRATION
EN MATIÈRE DE BREVETS (PCT)

(19) Organisation Mondiale de la Propriété
Intellectuelle
Bureau international



(43) Date de la publication internationale
12 septembre 2003 (12.09.2003)

PCT

(10) Numéro de publication internationale
WO 03/075468 A2

(51) Classification internationale des brevets⁷ :
H03M 13/29

(72) Inventeur; et

(21) Numéro de la demande internationale :
PCT/FR03/00679

(75) Inventeur/Déposant (pour US seulement) : **ROUXEL, Alexandre** [FR/FR]; 11 bis, rue Telles de la Poterie, F-92130 Issy-Les-Moulineaux (FR).

(22) Date de dépôt international : 3 mars 2003 (03.03.2003)

(74) Mandataire : **VIDON, Patrice**; Le Nobel (Bât. A), 2, allée Antoine Becquerel, BP 90333, F-35703 Rennes Cedex 7 (FR).

(25) Langue de dépôt : français

(26) Langue de publication : français

(30) Données relatives à la priorité :
02/02722 4 mars 2002 (04.03.2002) FR

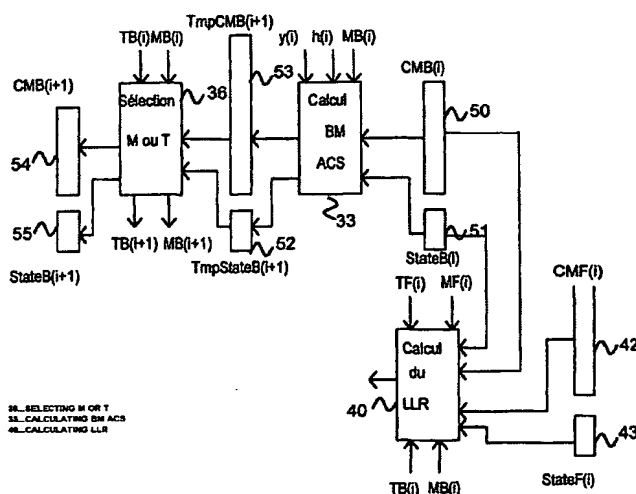
(81) États désignés (national) : AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NO, NZ, OM, PH, PL, PT, RO, RU, SD, SE, SG, SK, SL, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

(71) Déposant (pour tous les États désignés sauf US) : **WAVE-COM** [FR/FR]; 12 Boulevard Garibaldi, F-92442 Issy-Les-Moulineaux (FR).

[Suite sur la page suivante]

(54) Title: METHOD FOR PROCESSING A SIGNAL USING AN APPROXIMATE MAP ALGORITHM AND CORRESPONDING USES

(54) Titre : PROCÉDE DE TRAITEMENT D'UN SIGNAL METTANT EN ŒUVRE UN ALGORITHME DE TYPE MAP APPROCHE ET APPLICATIONS CORRESPONDANTES.



(57) Abstract: The invention concerns a method for processing a signal using an approximate MAP (maximum a posteriori) algorithm for determining a likelihood ratio Λ_k^x of a set of states X of a lattice at a time k, with each of said states being associated at least one intermediate variable belonging to a group comprising a so-called forward variable and a so-called backward variable, propagated by said MAP algorithm and recursively calculated respectively in a direct orientation and in an indirect orientation at said time k relative to said lattice. The invention is characterized in that said process comprises a step which consists in reducing the number of selected states by said MAP algorithm so as to calculate said likelihood ratio, and, for at least some unselected states, in assigning to said forward variable and/or said backward variable at least one specific value, to calculate an approximate likelihood ratio.

[Suite sur la page suivante]

BEST AVAILABLE COPY



(84) États désignés (régional) : brevet ARIPO (GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), brevet eurasien (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), brevet européen (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), brevet OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Publiée :

— sans rapport de recherche internationale, sera republiée dès réception de ce rapport

En ce qui concerne les codes à deux lettres et autres abréviations, se référer aux "Notes explicatives relatives aux codes et abréviations" figurant au début de chaque numéro ordinaire de la Gazette du PCT.

(57) **Abrégé :** Procédé de traitement d'un signal mettant en oeuvre un algorithme de type MAP approché et applications correspondantes. L'invention concerne un procédé de traitement d'un signal mettant en oeuvre un algorithme de type MAP ("Maximum a posteriori") permettant de déterminer un rapport de vraisemblance Λ_k^X d'un ensemble d'états X d'un treillis à un instant k , à chacun desdits états étant associées au moins une variable intermédiaire appartenant au groupe comprenant une variable appelée "forward" et une variable appelée "backward", propagées par ledit algorithme MAP et calculées récursivement respectivement dans un sens direct et dans un sens indirect audit instant k par rapport audit treillis. Selon l'invention, un tel procédé comprend une étape de réduction du nombre d'états sélectionnés par ledit algorithme de type MAP en vue d'un calcul dudit rapport de vraisemblance, et, pour au moins certains états non-sélectionnés, on affecte à ladite variable "forward" et/ou "backward" correspondante au moins une valeur déterminée, de façon à calculer un rapport de vraisemblance approché.

Procédé de traitement d'un signal mettant en œuvre un algorithme de type MAP approché et applications correspondantes.

Le domaine de l'invention est celui du traitement de signaux transmis dans un canal perturbé, ou susceptible de l'être.

5 Plus précisément, l'invention concerne un procédé de traitement du signal, mettant en œuvre un algorithme de type MAP (pour "Maximum A Posteriori"). L'algorithme MAP est notamment présenté dans l'article de L. E. Baum et T. Pertie, intitulé "Statistical Inference for Probabilistic Functions of Finite State Markov Chains" (en français, "Interférence statistique pour les fonctions
10 probabilistes de chaînes de Markov à états finis"), Ann. Math. Stat. 37 : 1554-1563, 1966.

L'algorithme MAP, aussi appelé algorithme du Forward-Backward (FB), suscite actuellement beaucoup d'intérêt. En effet, cet algorithme permet notamment de décoder un code convolutif en associant une information de
15 fiabilité aux bits décodés, et de nombreuses applications, telles que celles mettant en œuvre un "turbo-code" par exemple, peuvent en tirer profit.

On rappelle rapidement ci-après le principe de l'algorithme MAP. Par algorithme MAP, on entend ici, et dans toute la suite du document, aussi bien les algorithme de type MAP, que les algorithmes qui en sont dérivés, et notamment
20 les algorithmes de type Log-MAP et Max-Log-MAP.

De manière schématique, l'algorithme MAP peut être considéré comme la fusion des informations (les métriques de nœuds) générées par deux décodeurs de Viterbi modifiés travaillant en sens inverse sur les données. On rappelle que l'algorithme de Viterbi, couramment utilisé dans le domaine du décodage de
25 signaux reçus, consiste à rechercher dans un treillis représentatif du codage, le chemin qui correspond à la séquence d'états la plus probable, c'est-à-dire celle qui est à la distance minimale de la séquence reçue. Cet algorithme est décrit dans l'article de G. D. Forney, "The Viterbi Algorithm", Proceedings of the IEEE, vol. 61, No. 3, mars 1973.

L'algorithme MAP permet de déterminer le rapport de vraisemblance de la probabilité a posteriori des états à l'instant k , $0 \leq k \leq K$, d'une chaîne de Markov cachée à états finis, à partir d'observations $Y_o^K = \{Y_o, \dots, Y_K\}$. On définit généralement une chaîne de Markov comme une collection d'états aléatoires
 5 consécutifs enchaînés les uns aux autres, dans laquelle le passage d'un état à un autre est associé à une probabilité, appelée probabilité de transition.

On peut ainsi considérer une chaîne de Markov $\{X_k\}$ à valeurs dans un espace fini, $E = \{1, \dots, N\}$, définie par une matrice de transition entre états $\Pi = (\pi_{i,j})$, de dimension $N \times N$ et une loi initiale $v = (v_i)_{i=1}^N$ définie par
 10 $v_i = \text{Prob}[X_o = i], \forall i \in E$. Selon la terminologie classiquement employée, une transition entre deux états X_{k-1} et X_k est définie par un couple d'états, et est notée $\xi_k = (X_{k-1}, X_k)$. La matrice Π est la matrice de transition entre états associée à $\{X_k\}$ dont les éléments $\pi_{i,j}$ sont définis par :

$$\pi_{i,j} = \text{Prob}[X_k = j / X_{k-1} = i], \text{ pour tout } i, j \in E. \quad (1)$$

15 Dans toute la suite de ce document, on considère le cas des modèles de Markov cachés, pour lesquels on dispose d'observations bruitées $\{Y_k\}$ à valeur dans \mathcal{R}^d , recueillies à travers un canal sans mémoire. En d'autres termes, conditionnellement aux transitions entre états ξ_k , les observations $\{Y_k\}$ sont mutuellement indépendantes, et chaque observation Y_k ne dépend que de la
 20 transition ξ_k au même instant k . Par conséquent, le modèle de signal observé peut s'écrire sous la forme suivante :

$$Y_k = H(\xi_k) + B_k \quad (2)$$

où $H(.)$ représente la fonction de transfert du canal sans mémoire défini dans E et à valeur dans \mathcal{R}^d , $\xi_k = (X_{k-1}, X_k)$ est un couple d'états à l'instant k à valeur
 25 dans $E \times E$, Y_k représente une observation à l'instant k à valeur dans \mathcal{R}^d et où B_k est un bruit additif blanc.

Dans le contexte des communications numériques, le modèle défini par l'équation (2) peut s'appliquer en égalisation : le canal $H(.)$ représente alors le canal de transmission en bande de base et X_k représente une suite de symboles de
 30 l'alphabet de modulation dont la longueur est égale à la mémoire du canal.

Lors du décodage d'un code convolutif, $H(.)$ représente alors les polynômes générateurs du code, et X_k représente le contenu de la mémoire du codeur de canal.

On décrit désormais plus en détails la notion de rapport de vraisemblance calculé dans le cadre de l'algorithme MAP.

Le rapport de vraisemblance Λ_k^X d'un ensemble X appartenant à l'ensemble des parties de E est défini comme le rapport de la probabilité a posteriori de l'ensemble X sur la probabilité a posteriori du complémentaire de X dans E .

Le rapport de vraisemblance peut encore être exprimé sous la forme de l'équation suivante :

$$\Lambda_k^X = \frac{\sum_{i \in X} PAP_k^i}{\sum_{i \notin X} PAP_k^i} \quad (3)$$

où $PAP_k^i = P[X_k = i / Y_0 = y_0, \dots, Y_K = y_K], 0 \leq k \leq K$.

L'algorithme MAP est classiquement associé à une représentation en treillis des différents états à considérer. Ainsi, si l'on considère un codeur convolutif, l'algorithme MAP utilise, pour le décodage, la représentation en treillis de l'évolution temporelle du codeur. Le treillis est généralement représenté par un graphe, dont l'axe des abscisses figure le temps et l'axe des ordonnées représente les différents états possibles. Chaque nœud du treillis est donc associé à un état d'une part, et à un instant k d'autre part. Les transitions possibles entre les nœuds de deux instants successifs k et $k+1$ sont représentés par des branches.

L'algorithme MAP fait intervenir deux variables intermédiaires, respectivement appelées variable "forward" et variable "backward". Ces variables propagées par l'algorithme MAP sont calculées récursivement, respectivement dans le sens direct ("forward") et indirect ("backward") par rapport au treillis, et permettent d'aboutir au calcul du rapport de vraisemblance à chaque instant k .

Ces variables "forward" et "backward", définies dans la suite du document, utilisent la probabilité d'observer y_k conditionnellement aux états $X_k=j$ et $X_{k-1}=i$, exprimée par l'équation suivante :

$$b_{i,j}(Y_k) = \text{Prob}[Y_k = y_k / X_{k-1} = i, X_k = j] \quad (5)$$

Cette probabilité est classiquement appelée métrique. Elle peut éventuellement dépendre de k , et est fonction de la densité de probabilité du bruit B_k .

L'algorithme MAP procède en trois étapes, à savoir une étape de récursion avant (ou "forward"), une étape de récursion arrière (ou "backward") et enfin, une

5 étape de fusion des données.

La récursion "avant" consiste à calculer les probabilités α_i^k de passer par les nœuds représentatifs des états $X_i=i$ aux instants k , à partir des informations obtenues en parcourant le treillis dans le sens direct. La variable "forward" α_i^k est ainsi définie comme la probabilité de l'événement $(X_i = i, Y_0 = y_0, \dots, Y_k = y_k)$:

$$10 \quad \alpha_i^k = \text{Prob}[X_i = i, Y_0 = y_0, \dots, Y_k = y_k] \quad (6)$$

On peut démontrer que les α_i^k , $0 \leq k \leq K$, se calculent récursivement de la façon suivante :

$$\alpha_i^{k+1} = \sum_{j \in E} \pi_{j,i} b_{j,i}(Y_{k+1}) \alpha_j^k$$

avec la valeur initiale $\alpha_i^0 = v_i, \forall i \in E$.

15 De même, la récursion "arrière" consiste à calculer les probabilités β_i^k de passer par les nœuds représentatifs des états $X_i=i$ aux instants k , à partir des informations obtenues en parcourant le treillis dans le sens indirect. La variable "backward" β_i^k est ainsi définie comme la probabilité de l'événement $(X_i = i, Y_{k+1} = y_{k+1}, \dots, Y_K = y_K)$:

$$20 \quad \beta_i^k = \text{Prob}[X_i = i, Y_{k+1} = y_{k+1}, \dots, Y_K = y_K] \quad (7)$$

On peut démontrer que les β_i^k , $0 \leq k \leq K$, se calculent récursivement de la façon suivante :

$$\beta_i^k = \sum_{j \in E} \pi_{i,j} b_{i,j}(Y_{k+1}) \beta_j^{k+1}$$

avec la valeur initiale $\beta_i^K = 1, \forall i \in E$.

25 La troisième étape mise en œuvre par l'algorithme MAP consiste à fusionner les résultats des deux récursions pour calculer la probabilité "a posteriori" des états, en calculant le rapport de vraisemblance des symboles détectés.

Le rapport de vraisemblance d'un ensemble d'états défini par l'équation (3) peut alors être exprimé en fonction des variables intermédiaires "forward" et "backward" sous la forme :

$$\Lambda_k^x = \frac{\sum_{i \in X} \alpha_i^k \beta_i^k}{\sum_{i \in X} \alpha_i^k \beta_i^k} \quad (8)$$

5 Dans le contexte de la détection de symboles par exemple, l'ensemble X regroupe les états correspondant à l'émission d'un même symbole de la modulation. Dans le contexte de décodage de canal, l'ensemble X regroupe les états correspondant au même mot à l'entrée du codeur de canal.

L'algorithme MAP, bien que fournissant des résultats très performants, 10 présente l'inconvénient d'être très complexe à mettre en œuvre.

Notamment, la réalisation matérielle de l'algorithme MAP est très délicate, et les récepteurs implémentant cet algorithme sont par conséquent coûteux.

Les problèmes d'implémentation de l'algorithme MAP classique sont en partie dus à la forte dispersion des probabilités b_i^k qui nécessite donc une grande 15 précision pour le calcul des variables "forward" α_i^k et "backward" β_i^k . En outre, le calcul du rapport de vraisemblance tel que défini par l'équation (3) ci-dessus impose d'effectuer des divisions qui sont coûteuses et peuvent poser des problèmes de stabilité.

Pour résoudre ces différents inconvénients de l'algorithme MAP, on a 20 proposé des algorithmes de types Log-MAP ou Max-Log-MAP.

Néanmoins, les algorithmes de type Log-MAP ou Max-Log-MAP, comme les algorithmes de type MAP, restent très complexes à mettre en œuvre, et nécessitent d'effectuer un grand nombre d'opérations lors du calcul du rapport de vraisemblance.

25 L'invention a notamment pour objectif de pallier ces inconvénients de l'art antérieur.

Plus précisément, un objectif de l'invention est de fournir une technique de traitement de signal mettant en œuvre un algorithme MAP à complexité réduite par rapport aux techniques de l'art antérieur. Notamment, l'invention a pour

objectif de permettre une réduction du nombre de calculs mis en œuvre, tant par les algorithmes de type MAP, que par les algorithmes de type Log-MAP ou Max-Log-MAP, en réalisant un meilleur rapport performance / complexité que dans l'art antérieur.

- 5 Un autre objectif de l'invention est de mettre en œuvre une telle technique, permettant la conception de récepteurs moins complexes, et donc moins coûteux que dans l'art antérieur.

10 L'invention a encore pour objectif de fournir une telle technique qui réalise un compromis satisfaisant entre les exigences de faible complexité d'une part et de fiabilité des résultats d'autre part. En d'autres termes, l'invention cherche à fournir une méthode permettant de réduire systématiquement, avec une bonne qualité d'approximation, la complexité des algorithmes de types MAP, Log-MAP et Max-Log-MAP.

15 Ainsi, alors que les algorithmes de type MAP classiques nécessitent généralement la mise en œuvre d'un nombre d'opérations en A^{L-1} , où L représente la longueur du canal de transmission, et où A représente le nombre de caractères de l'alphabet de modulation, l'invention vise à fournir une technique mettant en œuvre un algorithme de type MAP mettant en œuvre un nombre d'opérations en A^M , où $M < L-1$, tout en conservant une bonne qualité d'approximation du rapport
20 de vraisemblance.

L'invention a également pour objectif de mettre en œuvre une telle technique qui permette une prise de décisions souples.

25 Ces objectifs, ainsi que d'autres qui apparaîtront par la suite, sont atteints à l'aide d'un procédé de traitement d'un signal mettant en œuvre un algorithme de type MAP ("Maximum a posteriori") permettant de déterminer un rapport de vraisemblance Λ_k^X d'un ensemble d'états X d'un treillis à un instant k, à chacun desdits états étant associées au moins deux variables intermédiaires, respectivement appelées variable "forward" et variable "backward", propagées par ledit algorithme MAP et calculées récursivement respectivement dans un sens
30 direct et dans un sens indirect audit instant k par rapport audit treillis.

Selon l'invention, un tel procédé comprend une étape de réduction du nombre d'états sélectionnés par ledit algorithme de type MAP lors d'un calcul dudit rapport de vraisemblance, et, pour au moins certains états non-sélectionnés, on affecte à ladite variable "forward" et/ou "backward" correspondante au moins

5 une valeur déterminée, de façon à calculer un rapport de vraisemblance approché.

Ainsi, l'invention repose sur une approche tout à fait nouvelle et inventive de mise en œuvre d'un algorithme MAP, permettant de simplifier les différentes étapes de traitement des signaux tout en maintenant une qualité de résultats satisfaisante. En effet, l'invention propose notamment de réduire le nombre d'états

10 sélectionnés par l'algorithme MAP pour le calcul du rapport de vraisemblance, de façon à simplifier les différentes étapes mises en œuvre lors d'un tel calcul, et d'attribuer aux variables intermédiaires manquantes des valeurs déterminées permettant de calculer un rapport de vraisemblance approché. L'invention repose donc sur un algorithme de type MAP approché, présentant un coût de calcul réduit

15 par rapport aux algorithmes MAP classiques. Les récepteurs de signaux mettant en œuvre un tel algorithme sont donc moins complexes à construire que les récepteurs de l'art antérieur.

Avantageusement, pour un instant k donné, ladite au moins une valeur déterminée $a(k)$ affectée à ladite variable "forward" est telle que

20 $0 \leq a(k) \leq \min_{i \in M_k^f}(\alpha_i^k)$, et/ou ladite au moins une valeur déterminée $b(k)$ affectée à ladite variable "backward" est telle que $0 \leq b(k) \leq \min_{i \in M_k^b}(\beta_i^k)$, où M_k^f et M_k^b représentent un ensemble desdits états sélectionnés respectivement dans ledit sens direct et dans ledit sens indirect audit instant k , et où α_i^k et β_i^k représentent respectivement lesdites variables "forward" et "backward" audit instant k .

25 Préférentiellement, pour un instant k donné, ladite valeur déterminée $a(k)$ et/ou $b(k)$ est unique et est affectée à au moins une variable "forward" α_i^k et/ou "backward" β_i^k .

Selon une variante avantageuse de l'invention, on affecte une valeur constante auxdites variables "forward", respectivement "backward", de façon que

ledit algorithme de type MAP soit un algorithme unidirectionnel de type direct, respectivement indirect.

Selon une caractéristique avantageuse de l'invention, ladite étape de réduction du nombre d'états met en œuvre un algorithme de recherche en treillis de type "breadth-first".

Selon une première variante préférentielle, ledit algorithme de type "breadth-first" est un algorithme de type M.

Selon une deuxième variante préférentielle, ledit algorithme de type "breadth-first" est un algorithme de type T, utilisant au moins un seuil.

Préférentiellement, ledit au moins un seuil est variable en fonction dudit instant k.

Avantageusement, on affecte audit seuil variable une valeur prédéterminée pour chaque instant k.

De manière préférentielle, pour chaque instant k, la valeur dudit seuil variable est déterminée par mise en œuvre d'un algorithme adaptatif.

De manière avantageuse, ledit algorithme adaptatif est du type algorithme de gradient.

Selon une caractéristique avantageuse de l'invention, ledit treillis comprenant une pluralité de nœuds associés chacun à un desdits états et à un instant k donné, la valeur dudit seuil variable T à un instant (k+1) est déterminée par l'équation suivante :

$$T(k+1) = T(k) - \mu(M(k) - M_c)$$

où T(k) représente la valeur dudit seuil variable audit instant k,

M_c est le nombre de nœuds dudit treillis propagés visé,

M(k) est le nombre de nœuds dudit treillis propagés audit instant k,

et μ est une constante positive représentative d'un gain d'apprentissage.

Préférentiellement, ledit algorithme adaptatif est du type algorithme de gradient à pas variable.

Avantageusement, ledit gain d'apprentissage μ est fonction dudit instant k.

Préférentiellement, ledit algorithme de type "breadth-first" étant un algorithme de type M, lesdites valeurs déterminées $a(k)$ et/ou $b(k)$ affectées respectivement auxdites variables "forward" et/ou "backward", à un instant k donné sont données par les équations suivantes :

$$\begin{aligned} 5 \quad a(k) &= \min_{i \in M_f^k} (a_i^k) - c_f \\ b(k) &= \min_{i \in M_b^k} (\beta_i^k) - c_b \end{aligned}$$

où c_f et c_b sont deux constantes positives.

De manière préférentielle, ledit algorithme de type "breadth-first" étant un algorithme de type T, lesdites valeurs déterminées $a(k)$ et/ou $b(k)$ affectées respectivement auxdites variables "forward" et/ou "backward", à un instant k donné, sont données par les équations suivantes :

$$\begin{aligned} 10 \quad a(k) &= T^f(k) - c_f \\ b(k) &= T^b(k) - c_b \end{aligned}$$

où c_f et c_b sont deux constantes positives, et où $T^f(k)$ et $T^b(k)$ désignent la valeur dudit seuil variable audit instant k respectivement dans ledit sens direct et dans ledit sens indirect.

Avantageusement, ledit algorithme de type MAP appartient au groupe comprenant :

- les algorithmes de type MAP ;
- 20 - les algorithmes de type Log-MAP ;
- les algorithmes de type Max-Log-MAP.

On notera que les variables "forward" et "backward" peuvent avoir des définitions différentes selon le type d'algorithme utilisé (MAP, Log-MAP ou Max-Log-MAP), ainsi que détaillé dans la suite du document.

25 Préférentiellement, ledit algorithme de type MAP étant un algorithme unidirectionnel, ledit procédé met en œuvre une étape de comparaison de décisions prises par ledit algorithme unidirectionnel avec des décisions correspondantes prises par un algorithme de type Viterbi, appelées décisions de Viterbi.

Par algorithme de type Viterbi, on entend ici, et dans toute la suite du document, un algorithme de Viterbi à nombre d'états réduit, auquel on associe une opération de "trace-back" (c'est-à-dire de décodage de l'algorithme). Ainsi, les décisions de Viterbi sont des décisions fournies par un algorithme à nombre
5 d'états réduit, auquel est associé un "trace-back".

Selon une première caractéristique avantageuse, en cas de comparaison négative pour au moins une desdites décisions prises par ledit algorithme unidirectionnel, ledit procédé met en œuvre une étape de substitution de ladite décision de Viterbi correspondante à ladite décision prise par ledit algorithme
10 unidirectionnel, appelée décision substituée.

Préférentiellement, on affecte à la valeur absolue dudit rapport de vraisemblance associé à ladite décision substituée une valeur déterminée V .

Avantageusement, ladite valeur déterminée V est égale à la valeur absolue du rapport de vraisemblance moyen de la séquence.

15 V correspond donc à la moyenne des fiabilités, soit environ à la fiabilité moyenne de la séquence.

Selon une deuxième caractéristique avantageuse, en cas de comparaison négative pour au moins une desdites décisions prises par ledit algorithme unidirectionnel, ledit procédé met en œuvre une étape de pondération dudit
20 rapport de vraisemblance associé à ladite décision considérée, tenant compte de ladite décision de Viterbi.

Préférentiellement, Y étant un ensemble d'états associés à une décision D_i^Y fournie par ledit algorithme de type Viterbi à un instant i , et Λ_i^Y représentant le rapport de vraisemblance associé à Y à l'instant i , calculé par ledit algorithme
25 unidirectionnel, au cours de ladite étape de pondération, on remplace Λ_i^Y par $\tilde{\Lambda}_i^Y$ défini par $\tilde{\Lambda}_i^Y = \Lambda_i^Y + D_i^Y \times V$, où V est une valeur déterminée.

L'invention s'applique avantageusement à l'un au moins des domaines appartenant au groupe comprenant :

- la détection de symboles ;
- 30 - le codage/décodage de signaux ;

- le turbo-décodage ;
- la turbo-détection ;
- le codage de source par quantification (notamment quantification en treillis).

5 L'invention concerne également un récepteur de signaux de communication comprenant des moyens de mise en œuvre d'un algorithme de type MAP ("Maximum a posteriori") permettant de déterminer un rapport de vraisemblance Λ_k^X d'un ensemble d'états X d'un treillis à un instant k , à chacun desdits états étant associée au moins une variable intermédiaire, appartenant au groupe comprenant une variable appelée "forward" et une variable
10 appelée "backward", propagées par ledit algorithme MAP et calculées récursivement respectivement dans un sens direct et dans un sens indirect audit instant k par rapport audit treillis.

Selon l'invention, un tel récepteur comprend des moyens de réduction du
15 nombre d'états sélectionnés par ledit algorithme de type MAP en vue d'un calcul dudit rapport de vraisemblance, et, pour au moins certains états non-sélectionnés, on affecte à ladite variable "forward" et/ou "backward" correspondante au moins une valeur déterminée, de façon à calculer un rapport de vraisemblance approché.

D'autres caractéristiques et avantages de l'invention apparaîtront plus
20 clairement à la lecture de la description suivante d'un mode de réalisation préférentiel, donné à titre de simple exemple illustratif et non limitatif, et des dessins annexés, parmi lesquels :

- la figure 1 présente un treillis représentatif d'une pluralité d'états associé à un algorithme MAP de l'invention ;
- 25 - la figure 2 présente un organigramme illustratif du principe de "trace-back" comparatif ou comparatif pondéré, mis en œuvre selon l'invention en combinaison avec les algorithmes MAP unidirectionnels ;
- la figure 3 présente un synoptique des différentes étapes de calcul mises en œuvre par l'algorithme de type MAP unidirectionnel de la figure 2,
30 appliqué à la détection de symboles dans un alphabet de A mots, où

$$A = 2^Q ;$$

- la figure 4 illustre les différentes étapes de calcul des variables "forward" mises en œuvre par un algorithme de type MAP bidirectionnel selon l'invention ;
- 5 - la figure 5 décrit les différentes étapes de calcul des variables "backward" mises en œuvre par l'algorithme de la figure 3, ainsi que les différentes étapes de calcul des rapports de vraisemblance .

Le principe général de l'invention repose sur la réduction du nombre d'états sélectionnés lors du calcul du rapport de vraisemblance de l'algorithme MAP, de manière à élaborer un algorithme MAP simplifié. Une telle réduction est
10 notamment réalisée, dans un mode de réalisation préféré de l'invention, par mise en œuvre d'un algorithme de type "breadth-first".

Préalablement à la description détaillée des figures mentionnées ci-dessus, on présente le principe de la réduction d'états mise en œuvre par l'invention, ainsi
15 que les différentes équations établies par les inventeurs.

Dans un mode de réalisation préféré de l'invention, les inventeurs ont envisagé d'avoir recours aux algorithmes de type "breadth-first", et notamment aux algorithmes de type M et de type T pour implémenter des algorithmes MAP à nombre d'états réduit.

20 Tout comme l'algorithme de Viterbi (décrit notamment dans l'article de G. D FORNEY « The Viterbi algorithm », Proceedings of the IEEE, vol 61, No 3, march 1973), l'algorithme M est un algorithme de recherche en treillis de type « breadth-first » (en français "largeur d'abord"; un tel algorithme examine le coût associé à une famille d'états à chaque instant) . L'algorithme de type M est
25 notamment décrit par J.B Anderson et S. Mohan dans « Sequential Coding algorithms : A survey and cost analysis » (en français, "Algorithmes de codage séquentiels : enquête et analyse de coût"), IEEE Trans. on Communications, vol. COM-32, Février 1984.

Pour chaque profondeur du treillis de la figure 1, l'algorithme de Viterbi ne conserve que le meilleur chemin passant par chaque nœud, illustré en trait épais sur la figure 1.

L'algorithme de type M conserve quant à lui les M meilleurs chemins
5 passant par les M meilleurs nœuds, où M est un entier inférieur au nombre de nœuds du treillis de l'algorithme de Viterbi. Ainsi, lors de la mise en œuvre de l'algorithme M, il est nécessaire de classer les nœuds du treillis (symbolisés par des points noirs sur le treillis de la figure 1) en fonction de leur métrique cumulée (on rappelle que la métrique cumulée des nœuds du treillis est équivalente à la
10 variable "forward"), afin de sélectionner les M meilleurs nœuds.

L'algorithme de type T est également un algorithme de type "breadth-first", mais diffère de l'algorithme M par la méthode mise en œuvre pour sélectionner les nœuds du treillis de la figure 1 propagés par l'algorithme. En effet, l'algorithme T sélectionne uniquement les nœuds du treillis associés à une
15 métrique cumulée dont la distance à la meilleure métrique cumulée du treillis est inférieure à un seuil T.

Selon l'invention, on prévoit avantageusement d'introduire de nouveaux algorithmes T de type "breadth-first", à seuil variable. Pour ce faire, les inventeurs ont envisagé deux approches distinctes :

20 - dans une première variante de réalisation de l'invention, on affecte un seuil, calculé a priori, à chaque transition (on rappelle qu'une transition d'un état à un autre est symbolisée par une branche du treillis de la figure 1). Ce seuil est calculé en tirant partie de la longueur finie de la séquence d'observation (sur le treillis de la figure 1, la séquence d'observation commence à l'instant
25 k et se termine à l'instant k+4). Ainsi, si l'on considère un treillis de longueur K+1, pour lequel BMAX représente la valeur maximale des métriques de branche, on choisit le seuil T(k) tel que :

$$T(k) \leq (K+1-k)BMAX \text{ et } 0 \leq k \leq K ;$$

- dans une deuxième variante de réalisation de l'invention, on fixe la valeur du
30 seuil de l'algorithme T, en mettant en œuvre un algorithme adaptatif. En

effet, un avantage de l'algorithme de type T, par rapport à l'algorithme M, est que, selon cet algorithme, il n'est pas nécessaire de classer les nœuds du treillis en fonction de leur métrique cumulée, pour sélectionner les meilleurs nœuds. L'algorithme de type T impose seulement de trouver le meilleur nœud du treillis, afin de normaliser les métriques cumulées de l'ensemble des nœuds du treillis. Dans cette deuxième variante de réalisation de l'invention, les inventeurs ont envisagé d'utiliser un algorithme adaptatif pour fixer le seuil de l'algorithme T, afin d'asservir sa complexité.

Par exemple, en utilisant un algorithme de gradient, on peut mettre le seuil à jour par l'équation suivante :

$$T(k+1) = T(k) - \mu(M(k) - M_c) \quad (9)$$

où M_c représente le nombre de nœuds propagés visé, $M(k)$ le nombre de nœuds propagés à l'instant k , et où μ est une petite constante positive que l'on appelle le gain d'apprentissage.

On peut également généraliser l'algorithme au cas où μ dépend de k , comme c'est le cas pour les algorithmes de type gradient à pas variable.

On présente désormais plus en détails la mise en œuvre de tels algorithmes de type "breadth-first" dans le cadre de la réduction du nombre d'états des algorithmes de type MAP.

Afin de pouvoir utiliser les algorithmes de type MAP avec un nombre d'états réduit, l'invention propose avantageusement d'affecter à chaque instant k une valeur par défaut $a(k)$ et $b(k)$ respectivement aux variables "forward" et "backward".

Soient M_k^f et M_k^b les ensembles des états sélectionnés respectivement dans le sens "forward" et "backward" à l'instant k .

Si l'état $X_k = i$ fait partie de l'ensemble M_k^f , c'est que cet état a été sélectionné à l'instant k .

Les variables "forward" α_i^k étant associées à des probabilités, elles doivent vérifier la condition de normalisation : $\sum_{i=1}^N \alpha_i^k = 1$. On peut démontrer que si l'on

veut vérifier cette condition, alors il faut choisir $a(k)$ tel que :

$$a(k) = \frac{1}{N - M} \sum_{i \in M_k^f} \alpha_i^k \quad (10)$$

Il apparaît de manière évidente que les variables "forward" α_i^k pour $i \notin M_k^f$ ne sont pas accessibles (les états associés n'étant pas sélectionnés, par définition de M_k^f), et l'on ne peut donc que déterminer des bornes de l'intervalle de variation de $a(k)$. En faisant l'hypothèse que les M états éléments de M_k^f ont les M plus grandes probabilités a posteriori (ou APP), on borne $a(k)$ par :

$$0 \leq a(k) \leq \min_{i \in M_k^f} (\alpha_i^k) \quad (11)$$

Si l'on fixe $a(k)$ à 0 quel que soit k , cela revient à considérer que les états non propagés ont une APP nulle et ne participent pas au calcul de la vraisemblance donné par l'équation (8). En d'autres termes, cela revient à attribuer une confiance absolue aux choix des M états propagés.

A contrario, si l'on fixe $a(k)$ à sa valeur maximale, alors on attribue une confiance minimale au choix des M états propagés.

On peut appliquer le même raisonnement aux variables "backward", ce qui conduit à déterminer $b(k)$ tel que :

$$0 \leq b(k) \leq \min_{i \in M_k^b} (\beta_i^k) \quad (12)$$

Les équations (11) et (12) ci-dessus peuvent être affinées dans le cadre de l'utilisation d'un algorithme de type M d'une part, et d'un algorithme à seuil de type T d'autre part.

En effet, lorsque l'on met en œuvre un algorithme de type M, on dispose à chaque instant k , du classement des états sélectionnés dans le sens direct (ou "forward") et indirect (ou "backward") respectivement, en fonction des valeurs de α_i^k et β_i^k . Il est donc aisé de déterminer les valeurs de $\min_{i \in M_k^f} (\alpha_i^k)$ et $\min_{i \in M_k^b} (\beta_i^k)$, et

donc d'affecter à $a(k)$ et $b(k)$ les valeurs suivantes :

$$a(k) = \min_{i \in M_k^f} (\alpha_i^k) - c_f \quad (13)$$

$$b(k) = \min_{i \in M_k^b} (\beta_i^k) - c_b \quad (14)$$

avec c_f et c_b deux constantes positives. Ces deux constantes c_f et c_b permettent de régler la confiance que l'on accorde au choix des états propagés.

Dans le cas d'un algorithme de type T, c'est-à-dire lorsque les états propagés par l'algorithme sont sélectionnés par un seuil (fixe ou variant au cours du temps comme proposé précédemment), la détermination des minima des équations (11) et (12) nécessite une charge de calcul supplémentaire importante.

- 5 Par conséquent, les inventeurs proposent, pour cette classe d'algorithme, de fixer $a(k)$ et $b(k)$ par l'intermédiaire du seuil :

$$a(k) = T^f(k) - c_f \quad (15)$$

$$b(k) = T^b(k) - c_b \quad (16)$$

- où $T^f(k)$ représente le seuil dans le sens "forward" à l'instant k, et où $T^b(k)$ représente le seuil dans le sens "backward" à l'instant k (tels que définis par exemple par l'équation (9) ci-dessus), c_b et c_f étant deux constantes positives.
- 10

- Dans la pratique, pour des raisons de simplicité d'implémentation, les algorithmes de type Log-MAP ou Max-Log-MAP sont souvent préférés aux algorithmes MAP classiques. En effet, le calcul du rapport de vraisemblance tel que défini par l'équation (3) ci-dessus nécessite, pour les algorithmes de type MAP classiques, d'effectuer des divisions qui sont coûteuses et peuvent poser des problèmes de stabilité. Pour cette raison, on préfère généralement utiliser les algorithmes travaillant dans le domaine logarithmique, qui propagent l'opposé du logarithme des variables "forward" et "backward", et aboutissent au calcul du logarithme du rapport de vraisemblance, encore appelé Log-vraisemblance (ou LLR pour "Log-Likelihood-Ratio") défini par :
- 15
- 20

$$LLR_k^x = -\text{Log} \left(\frac{\sum_{i \in X} PAP_k^i}{\sum_{i \in X} PAP_k^i} \right) \quad (3\text{bis})$$

où $PAP_k^i = P[X_k = i / Y_0 = y_0, \dots, Y_K = y_K], 0 \leq k \leq K$.

- Si l'on considère un codeur convolutif générant des symboles X_k , transmis par un canal bruité vers un récepteur qui reçoit des symboles Y_k et implémente un algorithme de type Log-MAP pour décoder les bits reçus, le signe de LLR_k^x donne la valeur du bit décodé, et sa valeur absolue indique la qualité de la décision.
- 25

L'application du principe de la réduction d'états, présenté ci-dessus pour les algorithmes MAP classiques, aux algorithmes de type Log-MAP ou Max-Log-MAP est présentée brièvement ci-après.

Soient $\bar{\alpha}_i^k = -\text{Log}(\alpha_i^k)$ et $\bar{\beta}_i^k = -\text{Log}(\beta_i^k)$ les variables logarithmiques "forward" et "backward". Selon l'invention, pour les algorithmes de types Log-MAP et Max-Log-MAP à nombre d'états réduit, les variables logarithmiques manquantes sont remplacées dans le sens "forward" et "backward" respectivement par $\bar{a}(k)$ et $\bar{b}(k)$ définis par :

$$\bar{a}(k) \geq \text{Max}_{i \in M_f^k}(\bar{\alpha}_i^k) \quad (17)$$

$$\bar{b}(k) \geq \text{Max}_{i \in M_b^k}(\bar{\beta}_i^k) \quad (18)$$

Ainsi, selon l'invention, lorsque la réduction du nombre d'états de l'algorithme de type Log-MAP ou Max-Log-MAP est réalisée par mise en œuvre d'un algorithme "breadth-first" utilisant un algorithme de tri (c'est-à-dire un algorithme de type M), on remplace les données manquantes respectivement dans le sens "forward" et "backward" par :

$$\bar{a}(k) = \text{Max}_{i \in M_f^k}(\bar{\alpha}_i^k) + \bar{c}_f \quad (19)$$

$$\bar{b}(k) = \text{Max}_{i \in M_b^k}(\bar{\beta}_i^k) + \bar{c}_b \quad (20)$$

avec \bar{c}_f et \bar{c}_b deux constante positives.

En ce qui concerne les algorithmes "breadth-first" utilisant un seuil pour sélectionner les états propagés dans le sens "forward" et "backward" (c'est-à-dire les algorithmes de type T), les données manquantes sont remplacées respectivement par :

$$\bar{a}(k) = \bar{T}^f(k) + \bar{c}_f \quad (21)$$

$$\bar{b}(k) = \bar{T}^b(k) + \bar{c}_b \quad (22)$$

avec $\bar{T}^f(k)$ et $\bar{T}^b(k)$ respectivement les seuils "forward" et "backward" (variant éventuellement en fonction du temps k , comme proposé précédemment).

L'invention permet également de combiner au principe de la réduction d'états présenté précédemment, des aspects relatifs à la simplification des

algorithmes classiques de type MAP (c'est-à-dire MAP, Log-Map et Max-Log-MAP).

Comme mentionné précédemment, les algorithmes MAP, Log-MAP et Max-Log-MAP nécessitent la propagation des variables "forward" et "backward" respectivement dans le sens direct et indirect, par rapport au treillis associé.

Dans une variante de réalisation de l'invention, on propose de simplifier ces algorithmes en fixant les variables "forward" ou "backward" à une valeur prédéterminée, de préférence constante, de façon à élaborer des algorithmes dits unidirectionnels. Ainsi, en fixant les variables "forward", α_i^k ou $\bar{\alpha}_i^k$ à une valeur constante quelconque quels que soient k et i , on obtient des algorithmes MAP, Log-MAP et Max-Log-MAP dits "indirects". De même, en fixant la variable "backward", β_i^k ou $\bar{\beta}_i^k$ à une valeur constante quelconque quels que soient k et i , on obtient des algorithmes dits "directs".

On peut alors appliquer le principe de la réduction d'états à ces algorithmes directs et/ou indirects, en mettant en œuvre les algorithmes de type "breadth-first" décrits précédemment, de façon à obtenir des algorithmes directs et/ou indirects à nombre d'états réduit. Ainsi, dans le cas d'un algorithme MAP indirect par exemple, pour lequel toutes les variables "forward" α_i^k ont été fixées à une valeur constante, on remplace les variables "backward" manquantes β_i^k (correspondant à des états non sélectionnés) par une valeur $b(k)$ prédéterminée, ainsi que décrit précédemment dans le document.

De telles méthodes de gestion des données manquantes permettent de rendre efficaces les algorithmes directs et indirects utilisant un nombre d'états réduit. En effet, lorsque le nombre d'états propagés est faible, il est probable que l'un au moins des ensembles sur lequel on calcule le rapport de vraisemblance défini par l'équation (3) soit vide.

La méthode proposée, selon laquelle on affecte des valeurs par défaut aux variables intermédiaires nécessaires au calcul du rapport de vraisemblance mais correspondant à des états non propagés du treillis, permet alors de déterminer le rapport de vraisemblance dès qu'il y a au moins deux états propagés dans le

treillis, et de lui affecter une valeur souple (encore appelée valeur "soft"). En effet, en affectant la valeur 0 à la probabilité d'un état non propagé, on obtient, pour les algorithmes de type MAP, des valeurs de rapport de vraisemblance en $\frac{0}{\text{constante}}$ ou en $\frac{\text{constante}}{0}$. Pour les algorithmes de type Log-MAP, on obtient des valeurs

5 de rapport de vraisemblance en $-\infty$ ou en $+\infty$.

Un inconvénient de ces algorithmes unidirectionnels, que les inventeurs ont identifié, est que les décisions prises par de tels algorithmes, c'est-à-dire le signe des rapports de vraisemblance définis par l'équation (3) (ou (3bis)), diffèrent généralement des décisions prises par les algorithmes mettant en œuvre un "trace-back". (On rappelle que les algorithmes mettant en œuvre un "trace-back"

10 permettent une prise de décision correspondant au chemin le plus vraisemblable).

En effet, les états associés aux décisions prises par les différents algorithmes unidirectionnels peuvent ne pas être autorisés par la matrice de transition Π . Dans une variante de réalisation avantageuse de l'invention, on a donc envisagé

15 d'utiliser conjointement un algorithme unidirectionnel à nombre d'états réduit avec un "trace back" comparatif ou comparatif pondéré.

Selon l'invention, le "trace back" comparatif consiste à comparer les décisions prises par un algorithme unidirectionnel aux décisions correspondantes prises par un algorithme de type Viterbi, ainsi qu'illustré en figure 2. On considère

20 Y , un ensemble d'états associés à la décision D_i^Y fournie par l'algorithme de type Viterbi à l'instant i . Soit Λ_i^Y , la vraisemblance associée à Y à l'instant i , calculée par l'algorithme unidirectionnel et Δ_i^Y la décision correspondante prise par l'algorithme unidirectionnel.

Au cours d'une première étape référencée 21, on calcule le rapport de

25 vraisemblance Λ_i^Y , de façon à prendre une décision Δ_i^Y pour l'algorithme unidirectionnel. On analyse (22) la décision D_i^Y correspondante pour l'algorithme de type Viterbi et on compare (23) ces deux décisions Δ_i^Y et D_i^Y .

Si les deux décisions diffèrent, alors la décision prise par l'algorithme de type Viterbi remplace (25) celle de l'algorithme unidirectionnel. La valeur absolue

30 des rapports de vraisemblance associés à ces décisions reste inchangée ou forcée à

une valeur V . V est soit fixée a priori à une valeur petite soit calculée pour chaque séquence. Dans ce dernier cas, on peut par exemple fixer V à la valeur absolue du rapport de vraisemblance moyen de la séquence.

Plutôt que de choisir brutalement entre la décision fournie par l'algorithme de type Viterbi D_i^Y et celle produite par l'algorithme unidirectionnel Λ_i^Y , on peut également faire une pondération de ces deux décisions : c'est ce que l'on appelle le principe du "trace back" comparatif pondéré, également illustré en figure 2.

Lors de l'étape de "trace back" comparatif pondéré, la vraisemblance Λ_i^Y est remplacée (24) par $\tilde{\Lambda}_i^Y$ définie par :

$$\tilde{\Lambda}_i^Y = \Lambda_i^Y + D_i^Y \times V \quad (23)$$

avec V égale à la valeur absolue du rapport de vraisemblance moyen calculée sur la séquence, ou fixée a priori.

On présente désormais, en relation avec la figure 3, un mode de réalisation des différentes étapes de calcul mises en œuvre par un algorithme de type MAP logarithmique unidirectionnel selon l'invention, appliqué à la détection de symboles dans un alphabet de A mots, où $A = 2^Q$.

Le vecteur CM(i) 31 contient les $M(i)$ métriques cumulées correspondant aux $M(i)$ états retenus à l'instant i stockés dans le vecteur State(i) 32 de taille $M(i)$ fois Q bits.

Le bloc 33 « calcul BM et ACS » calcule les $A.M(i)$ métriques cumulées associées aux $A.M(i)$ états suivant les $M(i)$ états du vecteur State(i) 32. Il effectue ensuite la sélection des meilleurs états convergeant vers le même nœud. Cette sélection consiste soit à sélectionner les états qui ont la plus petite métrique cumulée (dans le cas d'un algorithme de type Max-log-map unidirectionnel) soit à effectuer récursivement une opération de comparaison correction en utilisant la formule du logarithme Jacobien (dans le cas d'un algorithme de type Log-Map unidirectionnel).

Ainsi, dans le cas d'un algorithme unidirectionnel de type Max-Log-MAP, on procède en trois étapes successives :

a) Première étape : calcul de la métrique de branche $BM(i,j) = -\ln(b_{ij}(y_k))$, conformément à l'équation (5) décrite précédemment. On notera que la métrique de branche s'exprime simplement comme une distance euclidienne.

5 b) Deuxième étape : accumulation.

On met à jour les variables α_i^k (respectivement β_i^k) de manière simplifiée. On considère, à l'instant $k-1$, deux nœuds P_0 et P_1 associés respectivement aux variables "forward" $\alpha_{R(j)}^{k-1}$ et $\alpha_{R(j)}^{k-1}$. A l'instant k suivant, on considère le nœud final associé à la métrique cumulée $CM_j(k)$. La métrique de branche du nœud P_0 (respectivement P_1) au nœud final est $BM(P_0(j),j)$ (respectivement $BM(P_1(j),j)$). On a alors : $\bar{\alpha}_j^k = \max \left[\left(\alpha_{R(j)}^{k-1} + BM(P_0(j),j) \right), \left(\alpha_{R(j)}^{k-1} + BM(P_1(j),j) \right) \right]$.

10

c) Troisième étape : sélection.

On choisit le meilleur chemin qui converge vers chaque nœud : c'est cette étape qui va permettre le "trace-back".

15 Pour un algorithme de type Log-MAP, les première et troisième étapes sont identiques, mais, au cours de la deuxième étape de mise à jour des variables "forward", on a :

$$\bar{\alpha}_j^k = \max \left[\left(\alpha_{R(j)}^{k-1} + BM(P_0(j),j) \right), \left(\alpha_{R(j)}^{k-1} + BM(P_1(j),j) \right) \right] + f \left| \alpha_{R(j)}^{k-1} + BM(P_0(j),j) - \left(\alpha_{R(j)}^{k-1} + BM(P_1(j),j) \right) \right|$$

où $f(z) = \ln(1 + \exp(-z))$.

20 Les métriques des meilleurs nœuds sélectionnés par le bloc 33 « calcul BM et ACS » sont sauvegardées dans le vecteur $\text{TmpCM}(i+1)$ 34. Le nombre d'états sélectionnés à cette étape est compris entre $M(i)$ et $A.M(i)$. Les états correspondants sélectionnés à cette étape sont stockés dans le vecteur $\text{TmpState}(i+1)$ 35.

25 Le bloc 36 « sélection M ou T » permet de sélectionner les états propagés par l'algorithme MAP.

Si la réduction d'états met en œuvre un algorithme de type T, le bloc 36 « sélection M ou T » sélectionne les états dont la distance de la métrique cumulée par rapport à la meilleure métrique cumulée est inférieure à un seuil T.

Si la réduction d'états met en œuvre un algorithme de type M, le bloc 36 « sélection M ou T » sélectionne les M meilleurs états.

Dans le cas de l'algorithme de type T, le bloc 36 « sélection M ou T » calcule également le nouveau seuil $T(i+1)$ en fonction du nombre d'états
5 sélectionnés $M(i)$ en appliquant le seuil $T(i)$, comme décrit précédemment dans l'équation (9).

A l'issue de l'étape de sélection effectuée par le bloc référencé 36, on stocke dans le vecteur $CM(i+1)$ 37, les $M(i+1)$ métriques cumulées correspondant aux $M(i+1)$ états retenus à l'instant $i+1$ stockés dans le vecteur $State(i+1)$ 38 de
10 taille $M(i+1)$ fois Q bits.

Le vecteur $Survivor(i+1)$ 39, de taille N mots de Q bits contient l'indice des $M(i)$ branches qui convergent sur les $M(i)$ états retenus, stockés dans le vecteur $State(i)$ 32. L'état sur lequel converge la branche gagnante du treillis est codé par l'adresse de stockage de l'indice de la branche, sur Q bits.

15 C'est avec l'ensemble des vecteurs $Survivor(i+1)$ 39, pour i variant de 0 à $K-1$, que l'on effectue l'opération de "trace back", afin de déterminer les décisions à comparer ou à pondérer avec celles déterminées par le bloc 40 de calcul du LLR (pour "Log-Likelihood Ratio", ou rapport de vraisemblance logarithmique), ainsi que décrit précédemment en relation avec la figure 2.

20 On présente désormais, en relation avec la figure 4, un mode de réalisation du calcul des variables "forward" pour un algorithme logarithmique MAP bidirectionnel selon l'invention.

On rappelle que les algorithmes bidirectionnels de type Log-Map ou Max-Log-Map à nombre d'états réduit commencent, dans une première étape, par
25 calculer récursivement les variables "forward", comme pour les algorithmes unidirectionnels.

La figure 4 illustre le calcul de la liste des états conservés et des métriques cumulées dans le sens direct ou "forward".

A la différences des algorithmes unidirectionnels présentés en figure 3, les
30 métriques cumulées du vecteur $CMF(i)$ 42, les états sélectionnés correspondants

du vecteur $\text{StateF}(i)$ 43, et éventuellement le nombre d'états sélectionnés à chaque instant, sont stockés, afin d'être utilisés pour calculer les rapports de vraisemblance LLR lors de l'étape "backward".

Comme illustré par la figure 3, le vecteur $\text{CMF}(i)$ 42 contient les $\text{MF}(i)$ métriques cumulées correspondant aux $\text{MF}(i)$ états retenus dans le sens "forward" à l'instant i stockés dans le vecteur $\text{StateF}(i)$ 43 de taille $\text{MF}(i)$ fois Q bits.

Le bloc 33 « calcul BM et ACS » calcule les $\text{A.MF}(i)$ métriques cumulées associées aux $\text{A.MF}(i)$ états suivant les $\text{MF}(i)$ états du vecteur $\text{StateF}(i)$ 43. Il effectue ensuite la sélection des meilleurs états convergeant vers le même nœud, selon un procédé similaire à celui décrit en relation avec la figure 3.

Les métriques des meilleurs nœuds sélectionnés par le bloc 33 « calcul BM et ACS » sont sauvegardées dans le vecteur $\text{TmpCMF}(i+1)$ 44. Le nombre d'états sélectionnés à cette étape est compris entre $\text{MF}(i)$ et $\text{A.MF}(i)$. Les états correspondants sélectionnés à cette étape sont stockés dans le vecteur $\text{TmpStateF}(i+1)$ 45.

Le bloc 36 « sélection M ou T » permet de sélectionner les états propagés par l'algorithme MAP.

Si la réduction d'états met en œuvre un algorithme de type T, le bloc 36 « sélection M ou T » sélectionne les états dont la distance de la métrique cumulée par rapport à la meilleure métrique cumulée est inférieure à un seuil T .

Si la réduction d'états met en œuvre un algorithme de type M, le bloc 36 « sélection M ou T » sélectionne les M meilleurs états.

Dans le cas de l'algorithme de type T, le bloc 36 « sélection M ou T » calcule également le nouveau seuil dans le sens "forward" $\text{TF}(i+1)$ en fonction du nombre d'états sélectionnés $\text{MF}(i)$ en appliquant le seuil $\text{TF}(i)$, comme décrit précédemment dans l'équation (9).

A l'issue de l'étape de sélection effectuée par le bloc référencé 36, on stocke dans le vecteur $\text{CMF}(i+1)$ 46, les $\text{MF}(i+1)$ métriques cumulées correspondant aux $\text{MF}(i+1)$ états retenus à l'instant $i+1$ stockés dans le vecteur $\text{StateF}(i+1)$ 47 de taille $\text{MF}(i+1)$ fois Q bits.

Le calcul des métriques cumulées "backward" du vecteur CMB(i) 50 et des états sélectionnés stockés dans le vecteur StateB(i) 51 s'effectue de manière symétrique au calcul "forward", ainsi qu'illustré par la figure 5. La figure 5 présente également le calcul des LLR à partir des variables "forward" (métriques cumulées, liste d'états et éventuellement seuils) mémorisées dans le sens direct, et des nouvelles variables calculées dans les sens indirect.

Ainsi, le vecteur CMB(i) 50 contient les MB(i) métriques cumulées correspondant aux MB(i) états retenus dans le sens "backward" à l'instant i stockés dans le vecteur StateB(i) 51 de taille MB(i) fois Q bits.

10 Le bloc 33 « calcul BM et ACS » calcule les A.MB(i) métriques cumulées associées aux A.MB(i) états suivant les MB(i) états du vecteur StateB(i) 51. Il effectue ensuite la sélection des meilleurs états convergeant vers le même nœud, selon un procédé similaire à celui décrit en relation avec les figures 3 et 4.

15 Les métriques des meilleurs nœuds sélectionnés par le bloc 33 « calcul BM et ACS » sont sauvegardées dans le vecteur TmpCMB(i+1) 53. Le nombre d'états sélectionnés à cette étape est compris entre MB(i) et A.MB(i). Les états correspondants sélectionnés à cette étape sont stockés dans le vecteur TmpStateB(i+1) 52.

20 Le bloc 36 « sélection M ou T » permet de sélectionner les états propagés par l'algorithme MAP.

Si la réduction d'états met en œuvre un algorithme de type T, le bloc 36 « sélection M ou T » sélectionne les états dont la distance de la métrique cumulée "backward" par rapport à la meilleure métrique cumulée est inférieure à un seuil T.

25 Si la réduction d'états met en œuvre un algorithme de type M, le bloc 36 « sélection M ou T » sélectionne les M meilleurs états.

Dans le cas de l'algorithme de type T, le bloc 36 « sélection M ou T » calcule également le nouveau seuil dans le sens "backward" TB(i+1) en fonction du nombre d'états sélectionnés MB(i) en appliquant le seuil TB(i), comme décrit
30 précédemment dans l'équation (9).

A l'issue de l'étape de sélection effectuée par le bloc référencé 36, on stocke dans le vecteur $CMB(i+1)$ 54, les $MB(i+1)$ métriques cumulées correspondant aux $MB(i+1)$ états retenus à l'instant $i+1$ stockés dans le vecteur $StateB(i+1)$ 55 de taille $MB(i+1)$ fois Q bits.

5 Le calcul du LLR 40 utilise les métriques cumulées du vecteur $CMF(i)$ 42 et du vecteur $CMB(i)$ 50, ainsi que les états sélectionnés stockés dans les vecteurs $StateF(i)$ 43 et $StateB(i)$ 51. Dans le sens "forward" les métriques cumulées du vecteur $CMF(i)$ 42, les états du vecteur $StateF(i)$ 43, et éventuellement les seuils $TF(i)$ et le nombre d'états sélectionnés $MF(i)$, sont mémorisés pour toute la
10 séquence, c'est-à-dire pour i variant de 1 à K .

 Le bloc « Calcul du LLR » 40 peut utiliser les seuils $TF(i)$ et $TB(i)$, dans le cas d'une réduction d'états par algorithme de type T, ou les moins bonnes métriques cumulées $CMB(M)$ et $CMF(M)$, dans le cas d'une réduction d'états par algorithme de type M, pour gérer les données manquantes, comme exposé
15 précédemment. Tout comme pour les algorithmes unidirectionnels, le calcul du LLR utilise l'approximation Max-Log-Map ou la formule du logarithme Jacobien pour les algorithmes de type Log-Map.

REVENDICATIONS

1. Procédé de traitement d'un signal mettant en œuvre un algorithme de type MAP ("Maximum a posteriori") permettant de déterminer un rapport de vraisemblance Λ_k^X d'un ensemble d'états X d'un treillis à un instant k,
 5 à chacun desdits états étant associée au moins une variable intermédiaire, appartenant au groupe comprenant une variable appelée "forward" et une variable appelée "backward", propagées par ledit algorithme MAP et calculées récursivement respectivement dans un sens direct et dans un sens indirect audit instant k par rapport audit treillis,
- 10 caractérisé en ce qu'il comprend une étape de réduction du nombre d'états sélectionnés par ledit algorithme de type MAP en vue d'un calcul dudit rapport de vraisemblance,
 et en ce que, pour au moins certains états non-sélectionnés, on affecte à ladite variable "forward" et/ou "backward" correspondante au moins une valeur
 15 déterminée, de façon à calculer un rapport de vraisemblance approché.
2. Procédé selon la revendication 1, caractérisé en ce que, pour un instant k donné, ladite au moins une valeur déterminée $a(k)$ affectée à ladite variable "forward" est telle que $0 \leq a(k) \leq \min_{i \in M_k^f} (\alpha_i^k)$, et/ou ladite au moins une valeur
 20 déterminée $b(k)$ affectée à ladite variable "backward" est telle que $0 \leq b(k) \leq \min_{i \in M_k^b} (\beta_i^k)$, où M_k^f et M_k^b représentent un ensemble desdits états sélectionnés respectivement dans ledit sens direct et dans ledit sens indirect audit instant k, et où α_i^k et β_i^k représentent respectivement lesdites variables "forward" et "backward" audit instant k.
3. Procédé selon la revendication 2, caractérisé en ce que, pour un instant k
 25 donné, ladite valeur déterminée $a(k)$ et/ou $b(k)$ est unique et est affectée à au moins une variable "forward" α_i^k et/ou "backward" β_i^k .
4. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 3, caractérisé en ce qu'on affecte une valeur constante auxdites variables "forward", respectivement
 30 "backward", de façon que ledit algorithme de type MAP soit un algorithme unidirectionnel de type direct, respectivement indirect.

5. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 4, caractérisé en ce que ladite étape de réduction du nombre d'états met en œuvre un algorithme de recherche en treillis de type "breadth-first".
6. Procédé selon la revendication 5, caractérisé en ce que ledit algorithme de type "breadth-first" est un algorithme de type M.
7. Procédé selon la revendication 5, caractérisé en ce que ledit algorithme de type "breadth-first" est un algorithme de type T, utilisant au moins un seuil.
8. Procédé selon la revendication 7, caractérisé en ce que ledit au moins un seuil est variable en fonction dudit instant k.
9. Procédé selon la revendication 8, caractérisé en ce qu'on affecte audit seuil variable une valeur prédéterminée pour chaque instant k.
10. Procédé selon la revendication 8, caractérisé en ce que, pour chaque instant k, la valeur dudit seuil variable est déterminée par mise en œuvre d'un algorithme adaptatif.
11. Procédé selon la revendication 10, caractérisé en ce que ledit algorithme adaptatif est du type algorithme de gradient.
12. Procédé selon l'une quelconque des revendications 10 et 11, caractérisé en ce que, ledit treillis comprenant une pluralité de nœuds associés chacun à un desdits états et à un instant k donné, la valeur dudit seuil variable T à un instant (k+1) est déterminée par l'équation suivante :
- $$T(k+1) = T(k) - \mu(M(k) - M_c)$$
- où T(k) représente la valeur dudit seuil variable audit instant k,
M_c est le nombre de nœuds dudit treillis propagés visé,
M(k) est le nombre de nœuds dudit treillis propagés audit instant k,
et μ est une constante positive représentative d'un gain d'apprentissage.
13. Procédé selon l'une quelconque des revendications 11 et 12, caractérisé en ce que ledit algorithme adaptatif est du type algorithme de gradient à pas variable.
14. Procédé selon l'une quelconque des revendications 12 et 13, caractérisé en ce que ledit gain d'apprentissage μ est fonction dudit instant k.

15. Procédé selon l'une quelconque des revendications 2 à 14, caractérisé en ce que, ledit algorithme de type "breadth-first" étant un algorithme de type M, lesdites valeurs déterminées $a(k)$ et/ou $b(k)$ affectées respectivement auxdites variables "forward" et/ou "backward", à un instant k donné sont données par les

5 équations suivantes :

$$a(k) = \underset{i \in M_f^k}{\text{Min}}(a_i^k) - c_f$$

$$b(k) = \underset{i \in M_b^k}{\text{Min}}(\beta_i^k) - c_b$$

où c_f et c_b sont deux constantes positives.

16. Procédé selon l'une quelconque des revendications 2 à 14, caractérisé en ce que, ledit algorithme de type "breadth-first" étant un algorithme de type T, lesdites valeurs déterminées $a(k)$ et/ou $b(k)$ affectées respectivement auxdites variables "forward" et/ou "backward", à un instant k donné, sont données par les équations suivantes :

$$a(k) = T^f(k) - c_f$$

15 $b(k) = T^b(k) - c_b$

où c_f et c_b sont deux constantes positives, et où $T^f(k)$ et $T^b(k)$ désignent la valeur dudit seuil variable audit instant k respectivement dans ledit sens direct et dans ledit sens indirect.

17. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 16, caractérisé en ce que ledit algorithme de type MAP appartient au groupe comprenant :

- les algorithmes de type MAP ;
- les algorithmes de type Log-MAP ;
- les algorithmes de type Max-Log-MAP.

18. Procédé selon l'une quelconque des revendications 4 à 17, caractérisé en ce que, ledit algorithme de type MAP étant un algorithme unidirectionnel, ledit procédé met en œuvre une étape de comparaison de décisions prises par ledit algorithme unidirectionnel avec des décisions correspondantes prises par un algorithme de type Viterbi, appelées décisions de Viterbi.

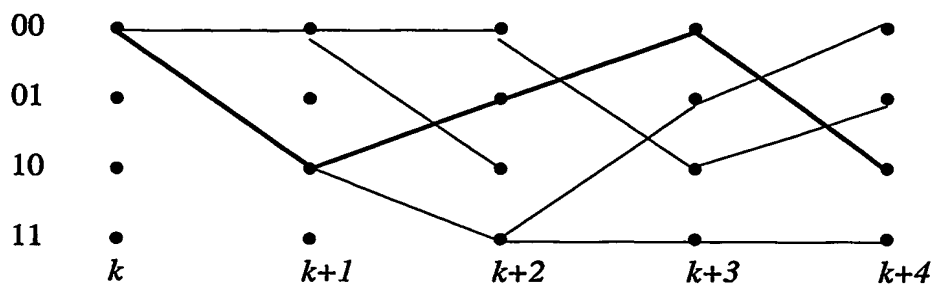
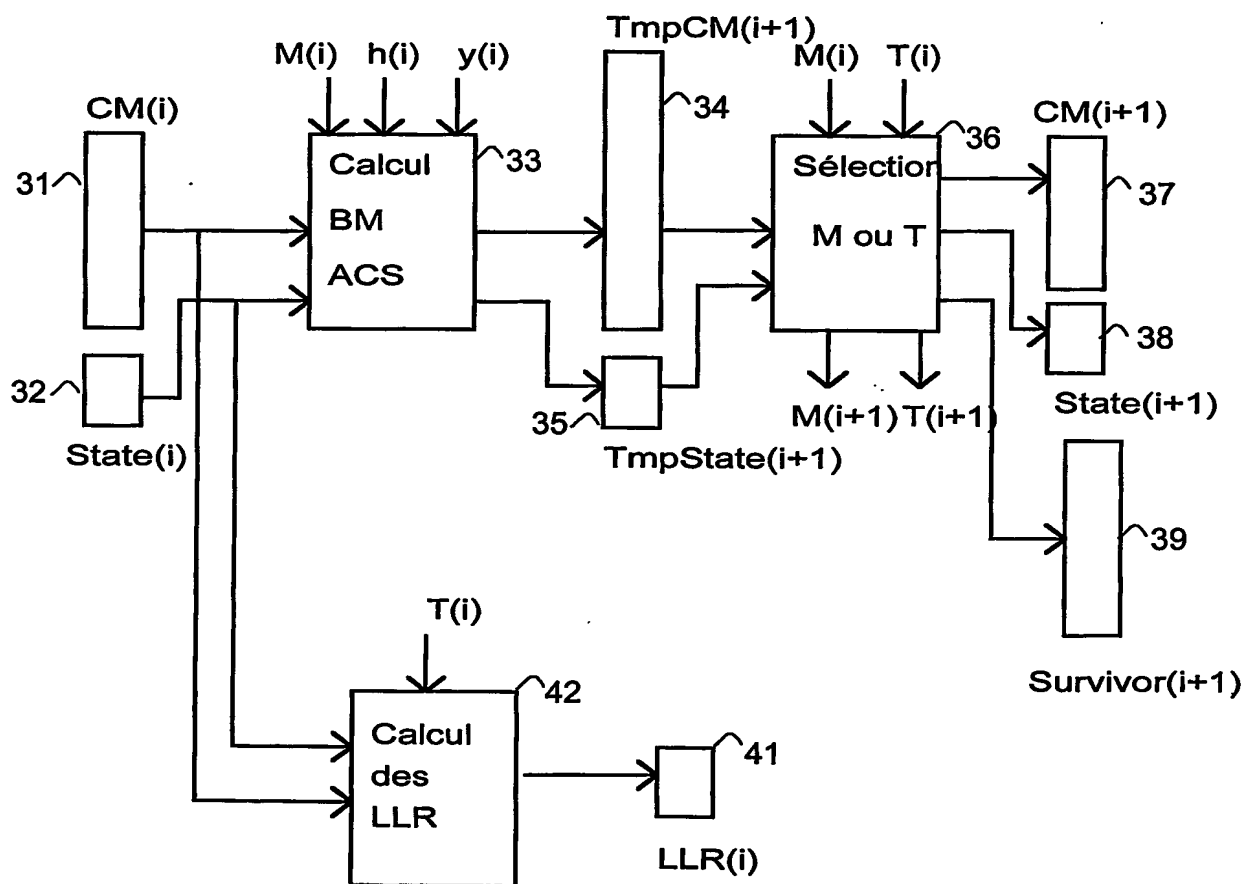
19. Procédé selon la revendication 18, caractérisé en ce qu'en cas de
30 comparaison négative pour au moins une desdites décisions prises par ledit

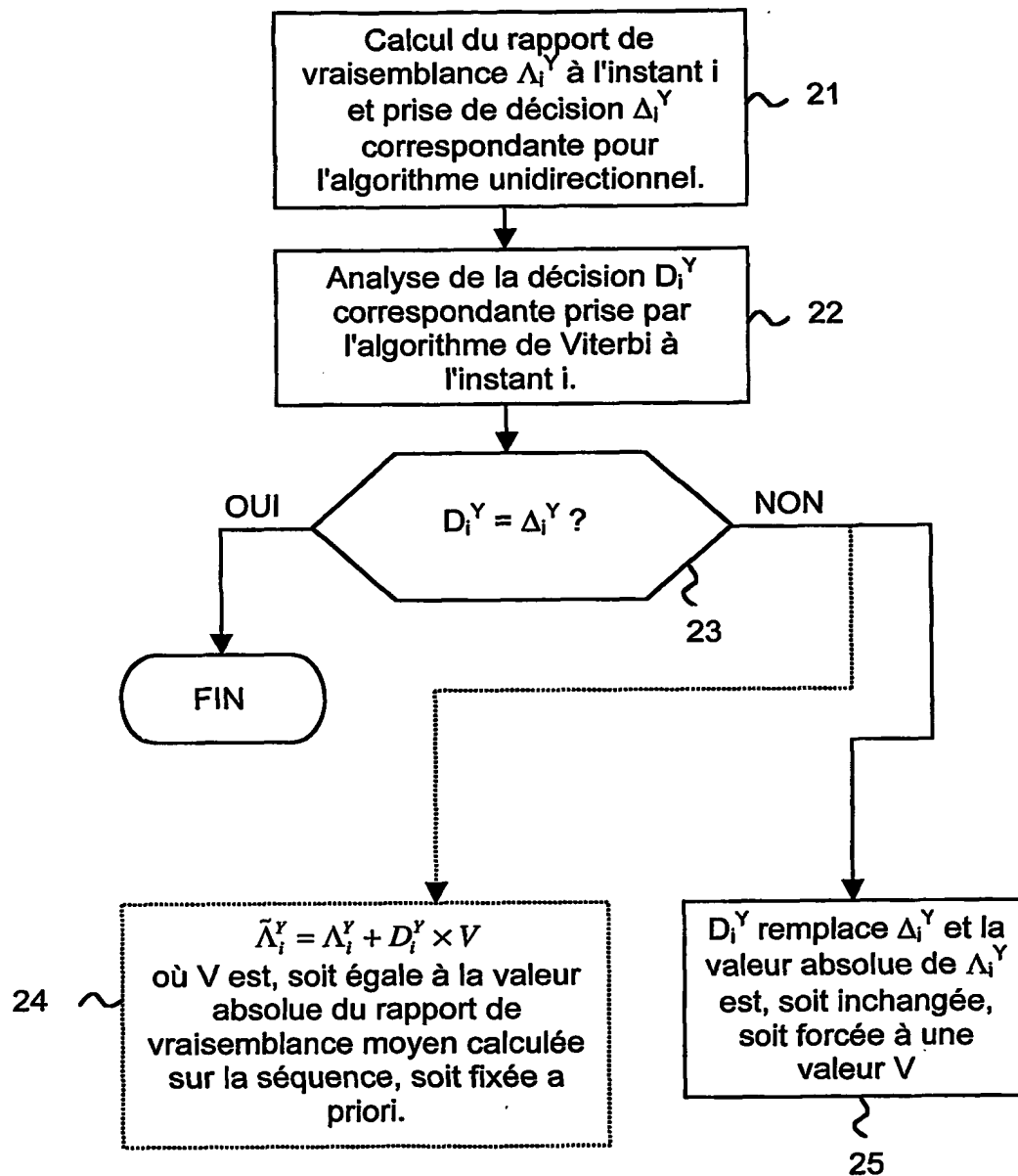
algorithme unidirectionnel, il met en œuvre une étape de substitution de ladite décision de Viterbi correspondante à ladite décision prise par ledit algorithme unidirectionnel, appelée décision substituée.

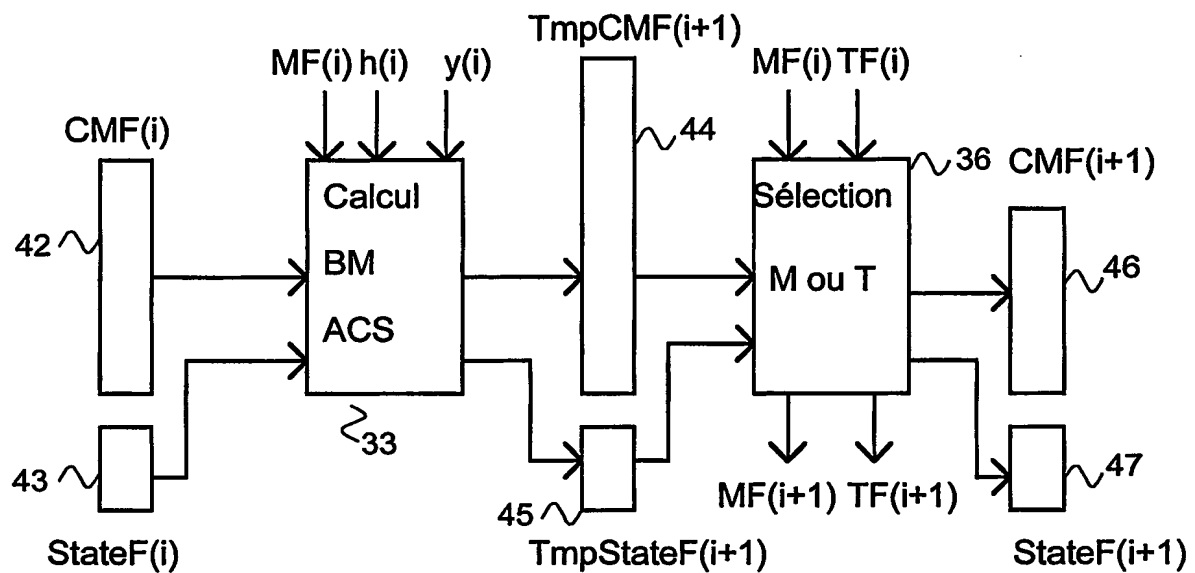
20. Procédé selon la revendication 19, caractérisé en ce qu'on affecte à la
5 valeur absolue dudit rapport de vraisemblance associé à ladite décision substituée une valeur déterminée V.
21. Procédé selon la revendication 20, caractérisé en ce que ladite valeur déterminée V est égale à la valeur absolue du rapport de vraisemblance moyen de la séquence.
- 10 22. Procédé selon la revendication 18, caractérisé en ce qu'en cas de comparaison négative pour au moins une desdites décisions prises par ledit algorithme unidirectionnel, il met en œuvre une étape de pondération dudit rapport de vraisemblance associé à ladite décision considérée, tenant compte de ladite décision de Viterbi.
- 15 23. Procédé selon la revendication 22, caractérisé en ce que, Y étant un ensemble d'états associés à une décision D_i^Y fournie par ledit algorithme de type Viterbi à un instant i, et Λ_i^Y représentant le rapport de vraisemblance associé à Y à l'instant i, calculé par ledit algorithme unidirectionnel, au cours de ladite étape de pondération, on remplace Λ_i^Y par $\tilde{\Lambda}_i^Y$ défini par $\tilde{\Lambda}_i^Y = \Lambda_i^Y + D_i^Y \times V$,
- 20 où V est une valeur déterminée.
24. Application du procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 23 à l'un au moins des domaines appartenant au groupe comprenant :
- la détection de symboles ;
 - le codage/décodage de signaux ;
 - 25 - le turbo-décodage ;
 - la turbo-détection ;
 - le codage de source par quantification en treillis.
25. Récepteur de signaux de communication comprenant des moyens de mise en œuvre d'un algorithme de type MAP ("Maximum a posteriori") permettant de

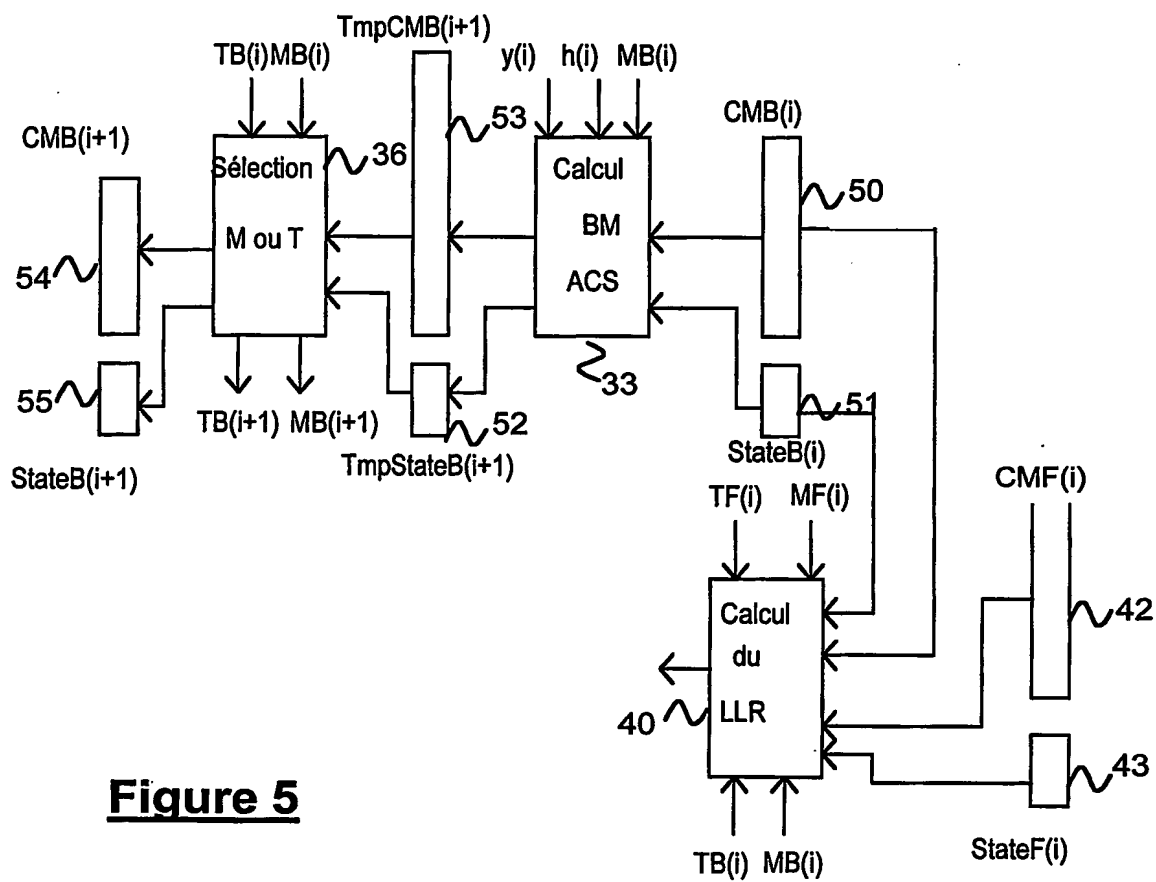
- déterminer un rapport de vraisemblance Λ_k^X d'un ensemble d'états X d'un treillis à un instant k ,
- à chacun desdits états étant associée au moins une variable intermédiaire, appartenant au groupe comprenant une variable appelée "forward" et une variable
- 5 appelée "backward", propagées par ledit algorithme MAP et calculées récursivement respectivement dans un sens direct et dans un sens indirect audit instant k par rapport audit treillis,
- caractérisé en ce qu'il comprend des moyens de réduction du nombre d'états sélectionnés par ledit algorithme de type MAP en vue d'un calcul dudit rapport de
- 10 vraisemblance,
- et en ce que, pour au moins certains états non-sélectionnés, on affecte à ladite variable "forward" et/ou "backward" correspondante au moins une valeur déterminée, de façon à calculer un rapport de vraisemblance approché.

1/4

**Figure 1****Figure 3**

**Figure 2**

**Figure 4**

**Figure 5**